Tesis de Grado de Ingeniería en Informática

Construcción y Evaluación Experimental de un Sistema de Banco de Pruebas Intravehicular para Ethernet Automotriz

Alumna: Sofia Morseletto

Director: Dr. Esteban Carisimo Co-director: Dr. Ion Turcanu







Objetivo

- Dentro del proyecto Building an In-Car Ethernet Testbed System
 - SECAN-Lab
 - Universidad de Luxemburgo
- Desarrollo de un banco de pruebas de Ethernet Automotriz intravehicular
 - Bibliotecas de código abierto
 - Dispositivos simples y económicos
 - Fácilmente replicado
- Calibración del banco de pruebas
 - Exigencias realistas de tráfico vehicular

Índice

- 1. Introducción
 - a. Motivación
 - b. Tecnologías Automotrices Preexistentes
 - c. ¿Por qué Ethernet?
 - d. AVB/TSN
- 2. Simulaciones
 - a. Entorno
 - b. Experimentos
 - c. Limitaciones
- 3. Banco de Pruebas Intravehicular
 - a. Hardware
 - b. Software
 - c. Experimentos Topológicos
 - d. Experimentos con Credit Based Shaper
- 4. Conclusiones

Motivación



The Race to the Edge of the Network



Edge computing is a distributed, open IT architecture that features decentralized processing power, enabling mobile computing and Internet of Things (IoT) technologies. In edge computing, data is processed by the device itself or by a local computer or server, rather than being transmitted to a data center.

The Self-Driving Car Race

One of the hottest topics in edge computing is self-driving cars, because a self-driving car can't be programmed to drive, but must think and act for itself, and it certainly cannot rely on the cloud and risk lag time.

The ability to process streams of sensor data and complex neural net pipelines in real-time is crucial. An autonomous car will require 50-100X the processing power and >10X the Dynamic Random Access Memory (DRAM) and Not And (NAND) technology of an Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) car today.

https://innovationatwork.ieee.org/the-race-to-the-edge-of-the-network/

SEAGATE BLOG



Latency may become a life or death factor

All the data for self-driving cars just can't be processed in the cloud. That introduces too much latency. Even a 100 millisecond delay — faster than the blink of an eye — could mean the difference between life and death for a passenger or pedestrian. These vehicles must sense, think, and act as quickly as nossible

To minimize the time between sensing and acting, at least some of the data needs to be analyzed on-board, in-car. That's where edge data analysis — a kind of data processing at the outer nodes of a network — comes into play. Driverless cars are part of a complex hybrid network that combines centralized data centers with lots of smaller edge data centers — including other autonomous and semi-autonomous vehicles, roadside gateways and sensor hubs, charging stations, traffic control boxes, and other connected devices.

https://blog.seagate.com/human/only-data-at-the-edge-will-make-driverless-cars-safe/

Introducción

Red Intravehicular

- Transmisión de información entre distintos dispositivos que componen el vehículo
- ECUs (Electronic Control Units)
- Nuevas tecnologías
 - Advanced Driver Assistance System (ADAS)
 - Sistemas de seguridad
 - Sistemas de entretenimiento
 - Navegación
- Proliferación de diferentes componentes electrónicos
- Más exigencias
 - Ancho de banda
 - Calidad de Servicio

Comunicación Intravehicular

- 1. Dispositivos extremo a extremo
 - Enlace físico por cada ECU
 - o n² conexiones
- 2. Comunicación multiplexada
 - ECUs agrupadas según la función
 - Gran heterogeneidad
 - Complejidad de cableado
 - Peso del vehículo



Tecnologías Preexistentes

- Controller Area Network (CAN)
 - o Robusto, flexible y de bajo costo
 - Demora no determinística
- Media Oriented Systems Transport (MOST)
 - Soporte para audio y video
 - Limitado para tráfico crítico

- FlexRay
 - Determinismo
 - Bajo tamaño de payload
- Local Interconnect Network (LIN)
 - Aplicaciones poco críticas
 - Propenso a colisiones

¿Por qué Ethernet?

- Homogeneizar las tecnologías de comunicación intravehiculares
- Tecnología estándar para LANs
 - Gran cantidad de protocolos robustos y probados se ejecutan sobre Ethernet
- Mayor ancho de banda
- Cableado Unshielded Twisted Pair (UTP)
- Gigabit Ethernet

Conflicto

Ethernet **no cumple** con los requisitos de ancho de banda, latencia, sincronización que demanda el mercado automotriz.

Solución

Protocolos que agreguen **determinismo** a Ethernet.

Audio Video Bridging/ Time Sensitive Networking (AVB/TSN)

Audio Video Bridging/Time Sensitive Networking

- Protocolo basado en Ethernet
- Audio Video Bridging Task Group de IEEE
- Soporte necesario para lidiar con audio, video y aplicaciones de control en tiempo real
- Tráfico categorizado según prioridades
- Garantías de demora de extremo a extremo





Audio Video Bridging/Time Sensitive Networking

- IEEE 802.1AS: Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications (gPTP)
 - Sincronización entre nodos
 - Best Master Clock Algorithm (BMCA)
- IEEE 802.1Qat: Stream Reservation Protocol (SRP)
 - Reserva online de recursos

- IEEE 802.1Qav: Forwarding and Queuing for Time-Sensitive Streams (FQTSS)
 - Encolado y gestión del tráfico por prioridades
 - Credit Based Shaper

- IEEE 802.1BA: Audio Video Bridging Systems
 - Identificación de nodos aptos para AVB

IEEE 802.1AS: Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications (gPTP)

- Sincronización de relojes de los miembros de la red
- Envío de mensajes para coordinación
 - Establecimiento de dominio gPTP
 - Selección de un reloj común entre todos los dispositivos
 - Best Master Clock Algorithm (BMCA)
 - o Sincronización de todos los relojes del dominio con el reloj Maestro

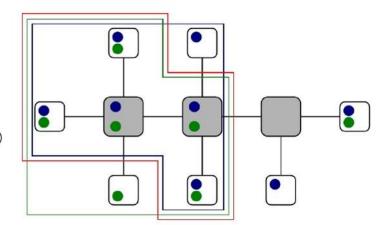
IEEE 802.1Qat: Stream Reservation Protocol (SRP)

- Control de admisión
 - Selección de dispositivos con los recursos necesarios
- Determinación de *streams* y reserva de recursos
- Calidad de Servicio
- Protocolos de señalización
 - Multiple MAC Registration Protocol (MMRP)
 - Multiple VLAN Registration Protocol (MVRP)
 - Multiple Stream Registration Protocol (MSRP)
- Dominio SRP

IEEE 802.1BA: Audio Video Bridging Systems

- Dominio AVB
 - Ejercer el estándar FQTSS
 - o Permitir MSRP y MVRP
 - Soporte para gPTP
 - Categorización del tráfico en clase A y clase B

- ☐ End Station
- Bridge
- gPTP Support
- gPTP Domain
- SRP Support (identical priorities)
- SRP Domain
- AVB Domain

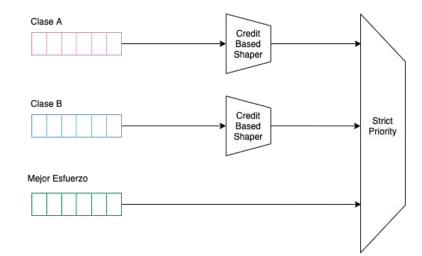


IEEE 802.1Qav: Forwarding and Queuing for Time-Sensitive Streams (FQTSS)

- Satisfacer requerimientos de envío y encolado de mensajes
- Conformado de tráfico según las prioridades determinadas por el protocolo
 - Clase A
 - o Clase B
- Credit Based Shaper como algoritmo de Selección de Transmisión

Algoritmos de Selección de Transmisión

- Priorizar tráfico de mayor criticidad
- Cumplir garantías de demora
- AVB/TSN aplica dos
 - Strict Priority
 - Orden de transmisión determinado por el número Priority Code Point (PCP)
 - Greedy
 - Se aplica a todo el tráfico
 - Credit Based Shaper
 - Sistema de créditos
 - Sólo se aplica a Clase A y B

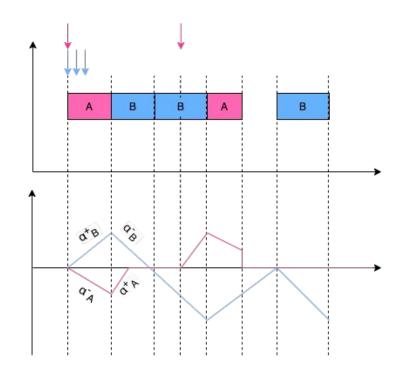


Credit Based Shaper

- Espera Equitativa Ponderada (Weighted Fair Queuing)
- Una trama puede ser transmitida si
 - a. No hay tramas pendientes de transmisión de prioridades más altas
 - b. No hay tramas pendientes de transmisión previas en la misma cola
 - c. Ninguna trama está siendo transmitida en ese momento
 - d. Su clase de tráfico no posee créditos negativos
- Previene la inanición del tráfico de menor prioridad

Credit Based Shaper

- Asigna una cantidad inicial de créditos a cada clase
 - a. Disminuye durante transmisión
 - b. Aumenta mientras está bloqueada
 - i. Otra clase está transmitiendo
 - ii. Tiene cantidad negativa de créditos
- Pendiente de inactividad (α^+)
 - a. Velocidad con la que los créditos aumentan
- Pendiente de envío (α^-)
 - a. Velocidad con la que disminuyen



Simulaciones

Índice

- 1. Introducción
 - a. Motivación
 - b. Tecnologías Automotrices Preexistentes
 - c. ¿Por qué Ethernet?
 - d. AVB/TSN
- 2. Simulaciones
 - a. Entorno
 - b. Experimentos
 - c. Limitaciones
- 3. Banco de Pruebas Intravehicular
 - a. Hardware
 - b. Software
 - c. Experimentos Topológicos
 - d. Experimentos con Credit Based Shaper
- 4. Conclusiones

Motivación

- Interiorizarse con el protocolo
- Explorar el entorno de simulación
- Probar factibilidad de topologías

Entorno

GNS3

- Gran popularidad
- Enfocado a hardware comercial

Mininet

- Flexible y sencillo
- Software Defined Networks (SDNs)

OMNeT++

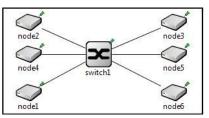
- Modelado de redes
- Admite extensiones para protocolos de red
 - INET
- CoRE4INET

Experimentos

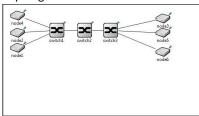
Simulaciones de distintas topologías

- Observar envío de mensajes
- Tres tipos de tráfico
 - Clase A
 - Clase B
 - Mejor Esfuerzo
- Configuraciones desafiantes
 - Puntos de congestión
 - Selección de tráfico por prioridades

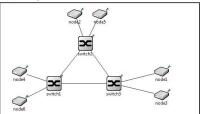
Topología Estrella



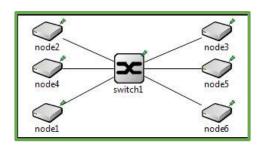
Topología Cadena

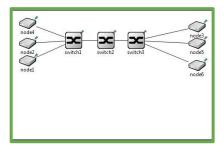


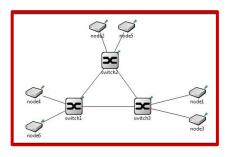
Topología Anillo



Experimentos





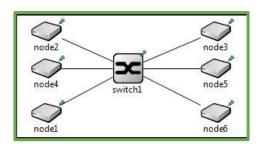


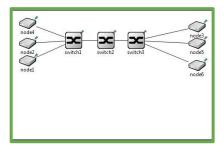
Topología Estrella

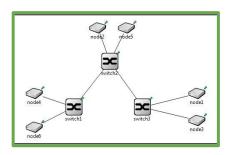
Topología Cadena

Topología Anillo

Experimentos







Topología Estrella

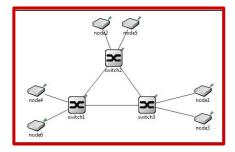
Topología Cadena

Topología Anillo

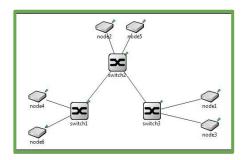
Topología Anillo

- Estructura con ciclos
- Errores de sobreescritura de mensajes
- No hay implementación del protocolo Spanning Tree en CoRE4INET

Topología Anillo Completa

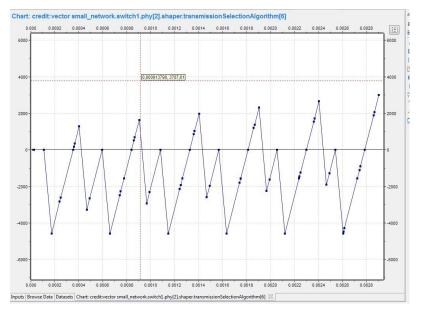


Topología Anillo Incompleta



Análisis de Resultados

- Evidenciar la ejecución del protocolo
- Observar detalles de su funcionamiento
 - SRP
 - o CBS
- Cumplimiento de garantías



Variación de créditos en base al tiempo en topología Estrella

Limitaciones

- Difícil instalación
- Poca portabilidad
- Comunidad chica
- Simulación cíclica no exitosa
 - o Spanning Tree no implementado en CoRE4INET pero sí en INET
 - o Complejidad del sistema de capas
- Usabilidad poco intuitiva



Banco de Pruebas

Índice

- 1. Introducción
 - a. Motivación
 - b. Tecnologías Automotrices Preexistentes
 - c. ¿Por qué Ethernet?
 - d. AVB/TSN
- 2. Simulaciones
 - a. Entorno
 - b. Experimentos
 - c. Limitaciones
- 3. Banco de Pruebas Intravehicular
 - a. Hardware
 - b. Software
 - c. Experimentos Topológicos
 - d. Experimentos con Credit Based Shaper
- 4. Conclusiones

Hardware

Necesidades

- Capacidad para asignar un timestamp a los mensajes de sincronización de gPTP con precisión de nanosegundos
- Network Interface Card (NIC)
 - o Capaz de discriminar entre prioridades altas y bajas
 - o Diferentes colas para cada nivel de prioridad
- CBS debe estar implementado a nivel de hardware como el algoritmo de selección de transmisión

Solución

- NIC Intel® I210 1Gbit/s
 - Apta para ejecutar
 - IEEE 802.1AS: gPTP
 - IEEE 802.1 Qav: FQTSS
 - IEEE 802.1 Qat: SRP

APU2D4

- 3 Puertos Ethernet
- NIC: Intel I210







Netgear GS716Tv3

- Switch apto para AVB
- 16 puertos
- Múltiples flujos concurrentes



Software

OpenAvnu

- Avnu Alliance
 - Asociación de empresas de manufactura y electrónica
- Comunidad activa
- Repositorio con implementación Open Source
- Estándar AVB/TSN completo
 - o gPTP
 - SRP
 - MMRP
 - MSRP
 - MVRP
 - Dominio AVB
 - Garantía de demora máxima



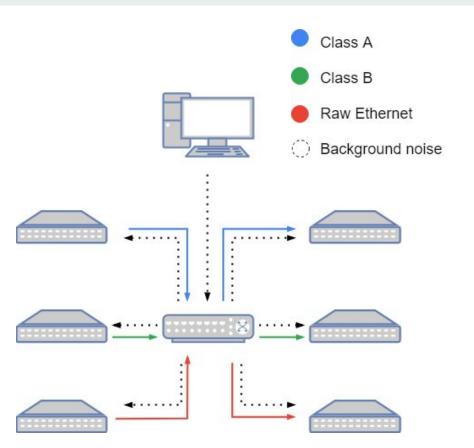
Experimentos Topológicos

Banco armado

- 3 switches
- 6 dispositivos
- 3 flujos de datos
 - o Clase A
 - o Clase B
 - Mejor Esfuerzo
- Tráfico de congestión de red mediante un script de Python
 - o UDP
 - Payload 1500 B
- Puertos limitados a 100 Mb/s
- Phc2sys para configuración de relojes

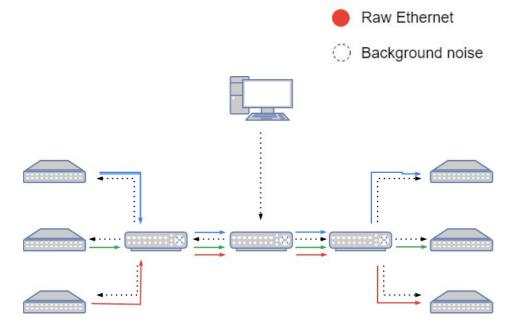


- Punto de congestión
- Prioritización de tráfico



Topología Cadena

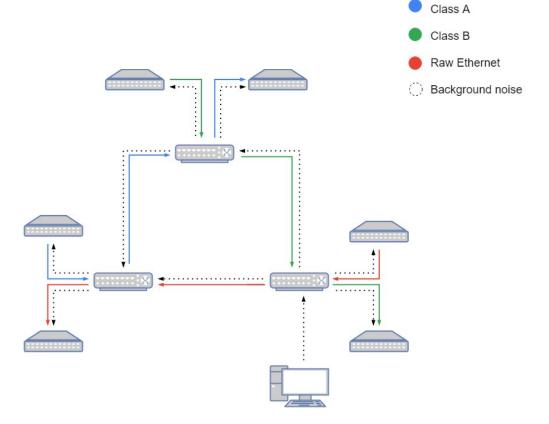
- Varios puntos de congestión
- Mayor cantidad de saltos de un punto a otro



Class A

Class B

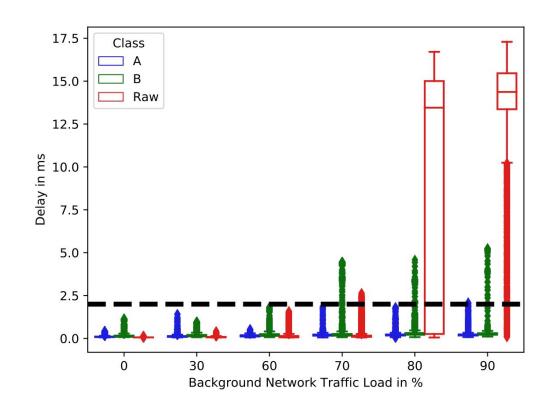
- Varios puntos de congestión
- Ciclos



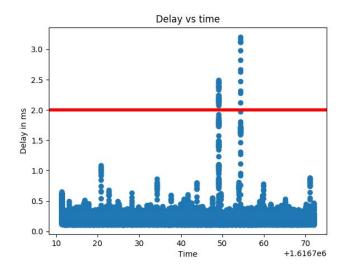
Análisis de Resultados

Demora

- Demora según la congestión de la red
- AVB/TSN constante
- Incremento considerable para Ethernet después de 80% de tráfico de fondo
- Reserva de ancho de banda para AVB/TSN
- Clase A mayor prioridad que clase B
- Se cumplen las garantías de demora

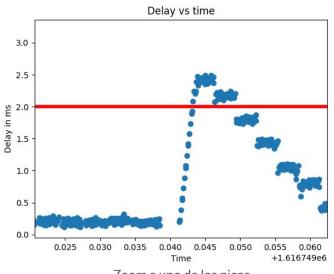


Análisis de demora



Demora de distintas tramas con 85% de tráfico de fondo

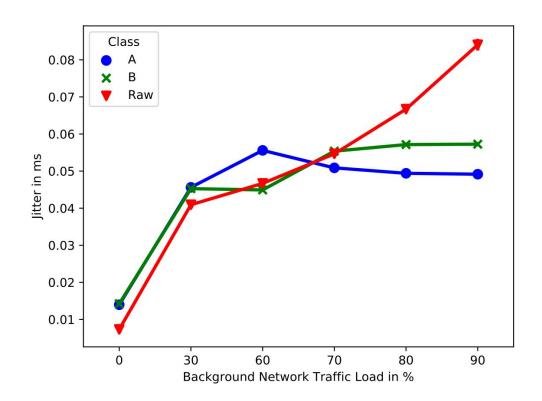
- Picos
- Disminuye lentamente en escalones



Zoom a uno de los picos

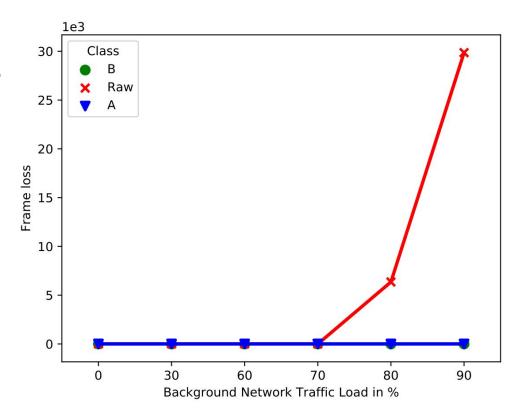
Jitter

- AVB/TSN se vuelve constante
- Ethernet muestra incrementa considerablemente



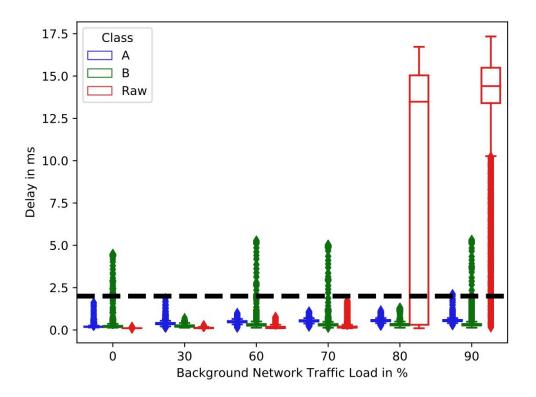
Pérdida de Paquetes

- AVB/TSN no sufre pérdidas
 - Garantía de Calidad de Servicio
 - o Dominio SRP
- Ethernet mantiene una metodología de Mejor Esfuerzo



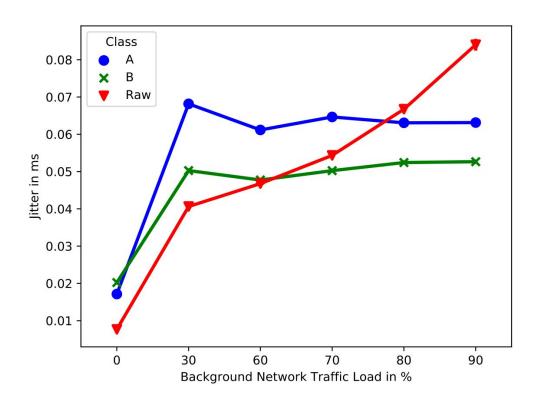
Demora

- Similar a topología Estrella
- Ethernet muestra incrementos en la demora



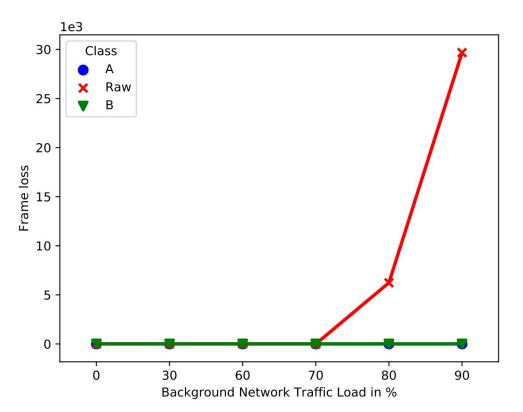
Jitter

• Ethernet presenta un incremento creciente a partir del 30% de tráfico



Pérdida de Paquetes

- AVB/TSN constante sin pérdida
- Ethernet comienza a perder paquetes a partir del 70%



Experimentos con Credit Based Shaper

Objetivos

- Individualizar el comportamiento de un algoritmo esencial para AVB/TSN
- Contrastar resultados experimentales con modelos analíticos
 - Modelo matemático presentado por Cao¹
 - Cota para el Peor Tiempo de Respuesta

$$WR_{int}(m) = WR_{no-int}(m) + C_L^{max}.(1 + \frac{\alpha_H^+}{\alpha_H^-}) + C_H^{max}$$

- Transmisiones de tráfico clase A y B variando:
 - O Máximo tamaño de trama de clase A (C_H^{max})
 - \circ Pendiente de inactividad de clase A (α_H^+)
- Tiempo de encolado de cada trama de clase B en el switch

¹"Tight worst-case response-time analysis for ethernet AVB using eligible intervals" - J. Cao and P. J. L. Cuijpers and R. J. Bril and J. J. Lukkien

Medición de Tiempo de Encolado

Conflicto ———

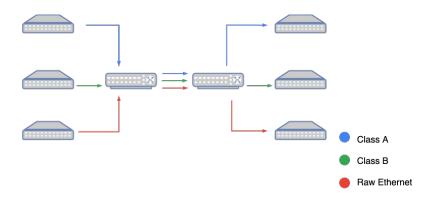
¿Cómo medir el tiempo desde que una trama entra hasta que sale de un switch?

Solución ———

Port Mirroring + Tcpdump

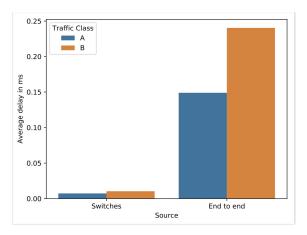
Metodología

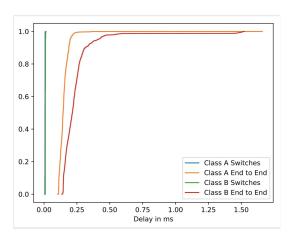
- Envío de copia de paquetes al puerto espejo
- Dos puertos conectados a dos APUs
- Captura de mensajes mediante
 Tcpdump



Validación de método de medición

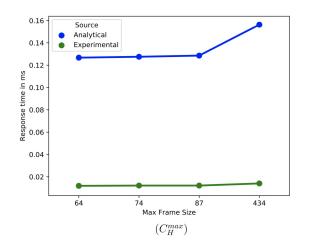
• **Hipótesis:** La suma del tiempo promedio de las tramas dentro de los switches no debe superar el tiempo para ser transferidas de un extremo a otro.

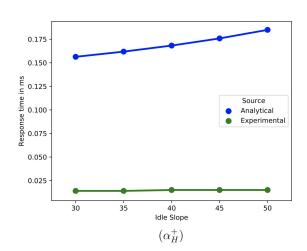




Resultados Experimentales vs Analíticos

- Los resultados analíticos acotan los experimentales
- Se refleja lo argumentado en el paper de Cao





Conclusiones

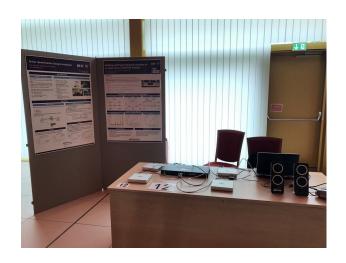
Índice

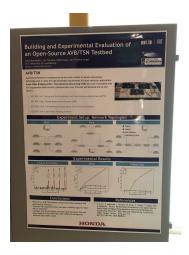
- 1. Introducción
 - a. Motivación
 - b. Tecnologías Automotrices Preexistentes
 - c. ¿Por qué Ethernet?
 - d. AVB/TSN
- 2. Simulaciones
 - a. Entorno
 - b. Experimentos
 - c. Limitaciones
- 3. Banco de Pruebas Intravehicular
 - a. Hardware
 - b. Software
 - c. Experimentos Topológicos
 - d. Experimentos con Credit Based Shaper
- 4. Conclusiones

Conclusiones

- No existe un flujo armónico entre el simulador y el entorno físico
- Armado de un banco de pruebas de bajo costo y código abierto
- Resultados exitosos
 - Se cumplen garantías de AVB/TSN
 - o El comportamiento de Ethernet es el esperado
- Es posible analizar aspectos detallados del protocolo
 - Credit Based Shaper
- Validación de modelos analíticos
- Se disponibiliza un entorno accesible de fácil implementación
 - Flexibilización de desarrollo de nuevas alternativas
 - Facilitación de iteraciones de prueba
 - Soluciones más robustas y confiables

Poster y Presentación







¿Preguntas?

Muchas gracias